

革新的製造プロセス技術開発（ミニマルファブ）

評価用資料

プロジェクト名	革新的製造プロセス技術開発（ミニマルファブ）			
上位施策名				
事業担当課	製造産業局産業機械課			
プロジェクトの目的・概要				
半導体製造装置の小型化やクリーンルームを不要とする技術を開発することにより、少量生産半導体の製造エネルギーを大幅に減らし、また設備投資の大幅削減が可能な製造プロセス技術（ミニマルファブ）を実用化する。 本開発を進める科学的・技術的意義として、産業技術総合研究所が初めて実現し、実用化を進めている局所クリーン化技術を実装した規格化された超小型半導体製造装置を用いて、様々な半導体製造プロセス技術を開発することで、クリーンルームを必要としない画期的な製造ラインが構築でき、その結果、研究開発装置と生産装置が同一システムになり、イノベーションにおける死の谷を実質的に無くす、生産直結型の全く新しいものづくりシステムを構築できるということが挙げられる。 また、社会的・経済的意義として、20世紀は大量生産型の産業モデルが中心となっていたが、21世紀型においては、3D プリンタによるメイカーズ革命(米国)、インダストリー4.0(独)で議論されているように、様々なニーズに対応できる多品種生産を、生産個数に応じてフレキシブルに対応できる産業モデルが求められている。ミニマルファブは、独の部品調達レベルでの取組みと異なり、また、米の単一のプロセス（プリンタ）の革新と質的に異なる、数百プロセスの本格的な生産システム自体が、多品種少量生産に対応できるように設計されたシステムであり、21世紀型製造産業のモデルケースを日本から発信して展開することが可能となる。ミニマルファブの開発によって、工場ラインと試作ラインの投資規模を大幅にコンパクト化していくことで、コスト競争力だけでなく、研究開発直結型であることを高付加価値の源泉とし、一方で新しく生み出された研究開発成果を実用に供するように具現化することで、大量生産型で頓挫し初期に消滅していた潜在市場を実際に具現化し、高付加価値製品を次々に生み出して社会を豊かにしていくことを最終的なアウトカムとしている。そのために、本プロジェクトではそのミニマルファブの基幹となるリソグラフィプロセスを中心とした半導体生産の主要前工程プロセス装置群の開発を目的としている。				
予算額等（委託） （単位：千円）				
開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成24年度	平成26年度	－	平成27年度	ミニマルファブ 技術研究組合
H24FY 執行額	H25FY 執行額	H26FY 執行額	総執行額	総予算額
650,000	699,000	2,500,000	3,849,000	3,849,000

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

シリコンウェハサイズを0.5インチ（直径12.5mm）、製造装置サイズを幅30cm×奥行き45cm×高さ144cmに規格化し、半導体の少量多品種生産に最適な超小型製造装置を必要な製造プロセスそれぞれについて開発し、生産システムとして一体的に利用できる装置群（ミニマルファブ）を構築する。さらに、開発した装置群がクリーンルームを必要としない工場システムとして稼働できるか、基本的なデバイスを試作して原理実証を行うことを全体目標とした。

具体的には、装置に必要な部品、ユニットを全て小型化することで半導体製造装置を小型化する。小型化製造装置を用いて基本的なデバイスを試作し、顕在化する多くの課題を製造装置試作の繰り返しによって解決する。装置試作の繰り返し回数が多いほど小型半導体製造装置の完成度はあがっていくため、基本となるプロセス装置をできるだけ多く試作する必要がある。従来大型装置の場合、プロセス原理は既知で単なる装置のスケールアップという開発であっても、プロトタイプ→ α 機→ β 機→量産機と4回の開発で実用に供される。従来国家PJではプロトタイプしか開発しないため、企業がその後の莫大な開発労力を惜しんで死の谷に埋没していたのである。ミニマルファブにおいても、真に死の谷を渡る開発を行うには繰り返し開発が必須である。我々は死の谷を渡るための開発を小型化が実現できた装置の台数として目標設定した。その際特に留意が必要なことは、特定のプロセス装置だけを沢山開発してもそれだけではほとんど無意味なことである。小型化が難しい小型化難開発装置はその装置の要素技術の小型化や高効率化自体を研究開発して行かなければならない。また、ファクトリーシステムを創造するプロジェクトであるから、全ての装置、要素技術が実用化されないと、目標とする工場システムの原理実証を行うことができない。この際、小型化難開発装置は、元々3年の短期間に設定されている本プロジェクトでは実用化までは行き着かない。それにも関わらずファクトリーシステムとしての実効性を検証する必要がある。そこで、これらの小型化難開発装置については、要素技術の小型化・高効率化を行いつつ、ファクトリーシステムとしての検証においては、別の代替プロセスを用いるか、または、既存の大型装置を併用することでシステム検証を行うこととした。実際、本プロジェクトにおいては、小型化難開発装置群以外の超小型半導体製造装置を必要な製造プロセスそれぞれについて開発し、生産システムとして一体的に利用できる装置群を構築した。

さらに、開発した装置群がクリーンルームを必要としない工場システムとして稼働できるかどうかを検証するために、基本的なデバイスを試作し原理実証を行った。MOSFETは今後展開を予定している集積回路作成技術開発に必要な最も汎用的な基本デバイス構造であること、カンチレバーはMEMSデバイスの基本構造であることから、ミニマルファブを用いたMOSFET、カンチレバー試作を目標とした。必要な全てのプロセス装置（約20種）の小型化を成功させ、それらの装置を使用してデバイスプロセスの開発を行うことは極めてチャレンジングな目標であったが、小型化難開発装置（イオン注入、CVD装置等）についても、実際にミニマル装置化できる見通しを得ることができた。さらに設定された目標以上の顕著な成果として、CMOSをミニマル装置のみを使用したフルミニマルプロセスで試作し、正常動作させた。これによって、原理的に論理回路をクリーンルームを用いないミニマルファブで製造できることを証明し、今後想定している高付加価値デバイスやマイクロプロセッサの開発が不可能ではないことを示した。

個別要素技術	事業アウトプット 目標・指標	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
①装置開発	80台	実績：83台、 達成度：104%	—
②装置構成部品・ウェハ開発	—	—	—
③ミニマルプロセスライン開発	MOSFET・カンチレバー試作、 10台の装置試作	MOSFET、カンチレバー、CMOS 試作、 装置実績：11台、 達成度：110%	—
④分析・評価装置開発	10台	実績：11台、 達成度：110%	—

【装置の内訳】

①ー1：パターニングに関する装置（5テーマ）	目標	40台	実績	42台
①ー2：ウェハ加工に関する装置（5テーマ）	目標	40台	実績	41台
③ミニマルプロセス・ライン開発に関する装置	目標	10台	実績	11台
④ウェハ検査（分析・評価）に関する装置	目標	10台	実績	11台

(2) 目標及び計画の変更の有無

<共通指標>

論文数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の 実施件数	ライセンス 供与数	取得ライセンス料 (万円：税抜)
6	56	14	12	187.6

誌上発表 (査読有)	題目	時期
1	IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines 「Photolithography for Minimal Fab System」	H25.9
2	Physics Procedia「Silicon chemical vapor deposition process using a half-inch silicon wafer for Minimal Manufacturing System」	H25.9
3	Surface & Coatings Technology 「Film depositioin using 1-inch-sized HIPIMS system – Toward minimal fabrication semiconductor production system 」	H26.7
4	Journal of Physics D-Applied Physics 「Transport of a helicon plasma by a convergent magnetic field for high speed and compact plasma etching 」	H26.10
5	IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing「A MOSFET Fabrication Using a Maskless Lithography System in Clean-Localized Environment of Minimal Fab」	H27.8

6	IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 「Analyses on Cleanroom-Free Performance and Transistor Manufacturing Cycle Time of Minimal Fab」	H27.10
商標		
55	商願 2012-097115「minimal」	H24.11
56	商願 2012-097114「ミニマル人型ロゴマーク」	H24.11

研究開発課題（プロジェクト）

1. 事業アウトカム

省エネ効果（年間）： 平成32年度で891 GWh ※

※ 平成32年度までに、クリーンルームを必要とするメガファブからミニマルファブに置き換わるファブは、「4インチウェハサイズ以下のファブ」、「ファブレス企業のR&Dファブ」、「試作品開発ファブ」を想定。国内106ファブのうち、41ファブが該当し、置換率は8.9%、年間消費電力削減量は、-891 GWhを見込む。

【算定根拠】

ミニマルファブに置き換わるファブのウェハ数 2,575,512枚/年（300mmウェハで換算） - ①

国内ファブのウェハ数 28,809,756枚/年（300mmウェハで換算） - ②

置換率【①/②】=8.9%

2. 研究開発内容及び事業アウトプット

(1) 研究開発内容

シリコンウェハサイズを0.5インチ（直径12.5mm）、製造装置サイズを幅30cm×奥行き45cm×高さ144cmに規格化し、半導体の少量多品種生産に最適な超小型製造装置（ミニマルファブ）を開発し、生産システムとして一体的に利用できる装置群を開発する。さらに、開発した装置群がクリーンルームを必要としない工場システムとして稼働できるかどうかを、基本的なデバイスを試作して原理実証を行うことを全体目標とした。

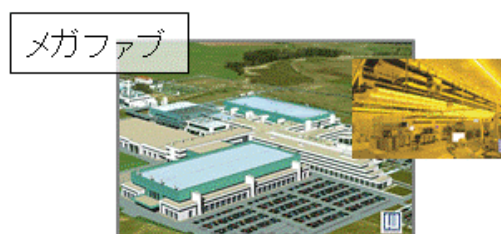
(2) 事業アウトプット

事業アウトプット指標 (目標値)	妥当性・設定理由・ 根拠等	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達の場合)
(事業開始時) -		-	-
(事業終了時) 製造したミニマル装置の数 (試作機を含む累積数) 100台	○デバイス試作のため、 リソグラフィープロセス をはじめとする25種類 の装置開発の必要性。 ○上記目標達成のためには、 累計100台超程度の 装置試作を重ね、完成 度を上げる必要がある。	105台	-
(事業目的達成時) 製造したミニマル装置の数 (試作機を含む累積数) 100台		105台	-

3. 当省(国)が実施することの必要性

半導体産業は、最先端の半導体を製造するための工場システムを一箇所立ち上げるだけでも数千億円程度の設備投資を必要とすることから、近年では一部のグローバル企業による寡占化が進んでいる。他方、I o Tが創出する半導体市場は、約5. 2兆円とも言われており、I o T半導体はローコストな半導体を必要としており、この製造には、最先端の半導体製造装置を要せず、少量多品種生産に対応した装置に対する需要が増すと想定されている。今後、国内の半導体産業を育成し、I o T社会に対応していくためには、既存の市場に対する対抗軸として高付加価値の半導体を低コストで生産するシステムの実現が重要であるが、クリーンルームを使用しない超小型の装置群の開発を進めることにより、半導体製造のコストを大幅に削減することが可能となる。

この研究開発は、先進的かつ多数の研究開発要素があり、民間企業のみで実施することは難しいことから、国内でのものづくり、製造プラットフォームの構築の観点から、国の研究開発プロジェクトとして実施する必要性がある。



200m (LSI 300台)

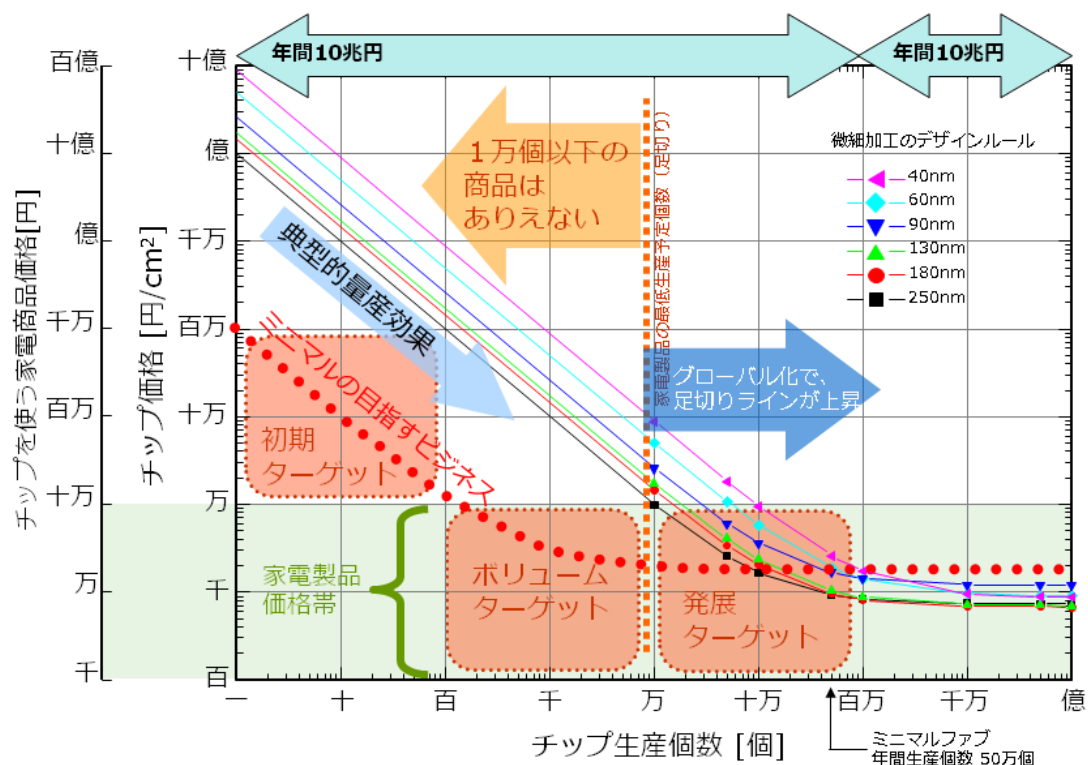
- 1ライン投資：5,000億円
- 装置サイズ：W3 D4 H3m
- ウェハサイズ：12"
- 生産規模：2億個 (1cm²換算)以上
- 床面積 40,000m² (LSI生産の場合)
- 装置数 300台 (LSI生産の場合)
- 工程数 600工程 (LSI生産の場合)
- 納期：1～6ヶ月
- コスト：100万円/cm² (100個注文)
- コスト：1万円/cm² (1万個注文)
- コスト：800円/cm² (百万個注文)



20m (LSI 350台)

- 1ライン投資：5億円
- 装置サイズ：W0.3 D0.45 H1.44m
- ウェハサイズ：0.5"
- 生産規模：50万個 (1cm²換算)以上
- 床面積 400m² (LSI生産の場合)
- 装置数 350台 (LSI生産の場合)
- 工程数 350工程 (LSI生産の場合)
- 納期：1～3日
- コスト：1万円/cm² (100個注文)
- コスト：1,200円/cm² (1万個注文)
- コスト：1,200円/cm² (百万個注文)

グローバルマーケットの原理とミニマルデバイスターゲット



4. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

平成32年度における事業アウトカム目標値は、年間省エネ効果 891GWh の達成である。研究開発におけるデバイス試作市場、設備が極めて老朽化している4インチ以下の小口径ウェハラインにおける多品種少量デバイス製造市場向けを手始めに、ミニマルファブの導入を進めていく。これらの既存ファブをミニマルファブに置き換えることで、同じ面積のデバイスを製造する場合 87%の電力削減効果が見込まれる。

ミニマルファブを産業システムとして成立させる上で留意すべき非常に重要なことは、ミニマルファブはシステムであり、ここの装置や部材が勝手に開発や商品化されたのでは、全てがバラバラになってしまう一つのシステムとして機能しなくなるということである。この課題を克服するために、知財戦略、スタンダード戦略、認証戦略を一体化運営する体制を構築した。国内出願だけで 80 に上る特許は全て公的機関である産総研と共願であり、ミニマルファブの開発には産総研の許諾が必要である。標準化は、ミニマルファブのコミュニティそのものである産総研コンソーシアム・ファブシステム研究会が担っている。また、そこで策定されたミニマルファブの仕様を満たしたミニマル製品には、ミニマル製品としての認証を与えるという仕組みをプロジェクト中に構築し、既に実施している。また、模倣を防ぐために、ブランド化は有効である。“ミニマル”および“minimal”を世界 9 ヶ国に商標登録し、ミニマル装置のデザインについても、優秀なデザイナーを導入して、デザインを際立たせ類似品が一目で分かるようにした。ミニマル装置のデザインは、グッドデザイン 2014 において特別賞を受賞した。さらに、局所クリーン化テクノロジーのコア部分のウェハ搬送容器「ミニマルシャトル」は、意匠登録してある。この我々が整備してきた、知財-標準化-ブランド化-認証、これらを全て実効的に機能させた総合戦略的事業は、恐らくは日本では初めてと言える、強力なシステム開発の取組みである。この仕組みは、開発労力とビジネス展開を行う上で、企業には模倣を防ぎ、失敗を大きく減じて、投資効果が着実に得られる見通しを持つ効果もあり、ファブシステム研究会は、年 20 社ほどのペースでこの 5 年ほど加入企業が増大を続けている。 実際、本プロジェクトで装置開発を進めていた 2 年目には、トヨタ自動車の子会社であるジェイテクトが、ミニマル装置を実際に購入し、ミニマル装置が開発されていないプロセス装置については既存大型装置との併用（ハイブリッドプロセス）することによって、デバイス開発を進めている。開発プロジェクト中に顧客が現れて購入をするということは、国家プロジェクトでは極めて稀なことである。また、プロジェクトの最終年度においては、株式会社ピーエムティーが、ミニマルファウンドリを立ち上げることを表明し、PJ 終了後に、ハイブリッドプロセスの手法によって実際にファウンドリ事業展開を開始している。

横河ソリューションサービス株式会社では、2015 年 10 月、顧客サービス向けのミニマルアプリケーションラボ事業を開始した。ミニマルファブでは、既存大デバイスメーカ以外への産業展開を志向しているのであるから、それらの新規参入企業へのサポートが非常に重要になる。横河のサービスへの取組みは、それを可能にする具体例である。また、日本電子デバイス産業協会（NEDIA）は、2015 年 12 月に、ミニマルファブを用いたファウンドリ設立のための準備会社「ネイタス」の立ち上げを発表した。

さらに新規のユーザーへ、ミニマルファブ導入を進めていくために、産総研つくばセンター設置のミニマルモデルルームにおいて、ファブトライアル（ミニマルファブを使った MOSFET 試作）を初めとするプログラムをファブシステム研究会、ミニマルファブ技術研究組合、産総研で用意し、実際に 2015 年度に 5 社から試作を受注し、依頼されたフルミニマル（ミニマル装置だけの製造）またはハイ

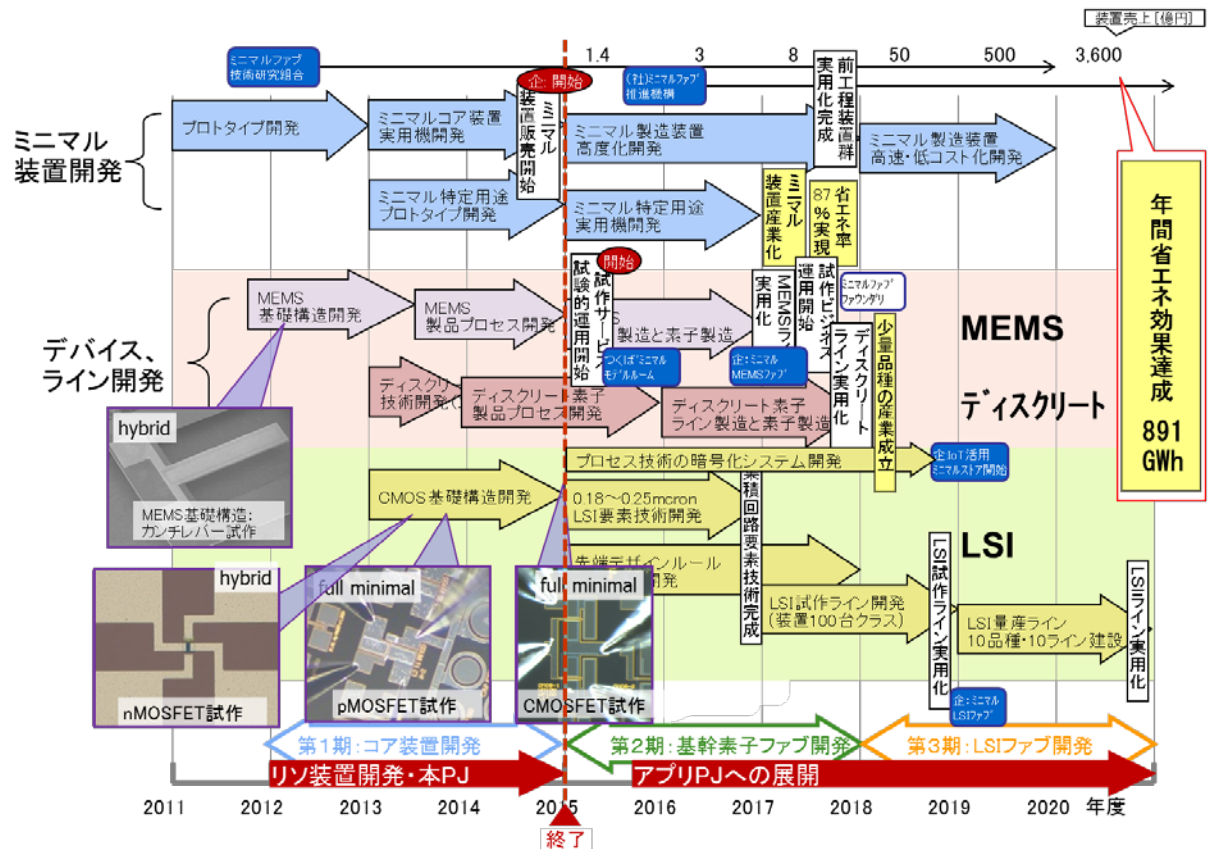
ブリッド（既存装置を組合せた製造）によるデバイス試作を完了した。年内に他に2社の受注を予定している。

また、サポータィングインダストリー（ものづくり基盤技術）は、ミニマル装置の個別開発に極めて適している。ミニマルファブでは国家的意義があり、上記のユーザ企業が揃っているため、大学等でのプロセス技術のシーズをミニマル装置化することで、すぐに有効なビジネスにつなげられるためである。実際、2015年度にミニマル装置開発で新規4件が採択され、主にプラズマ関係で開発を進めている。

上記のような活動によって、大がかりな公的な予算処置が無い中、ミニマルファブの開発を進めつつ、2015-2017の3年間は、CVD、イオン注入装置などの難開発装置と電子ビーム露光装置の実用化、プロセス技術の暗号化開発、MEMS及びディスクリート素子ラインの実用化、LSI要素技術開発を行う。2018-2020の3年で、ミニマル装置の低コスト化開発と多層配線技術開発によるLSI製造ラインを完成させる。装置単体での実用化とファクトリーレベルでの実用化には、その開発の難易度と総合性において大きな開きがある。まず、装置群が全部出来ていなければデバイスは製造できない。次に、それらの装置が完全に動作していなければならない。装置単体であれば、10回に1度のミス動作は許される（歩留まり90%）が、集積回路を作る場合、ミニマル装置を350台使い、600工程を完遂しなければならない。この場合、総合歩留まりを90%にするには、一つ一つの装置の成功確率は99.982%にしなければならない。このくらいの高い安定性が求められる。また、前のプロセスによって自らのプロセスが影響を受けるため、プロセス全体での開発が求められる。たとえば、感光材は温湿度で塗布膜厚が変わるため、その後の露光と現像、そしてプラズマエッチングの製造条件が全く変わってしまう。これらを総合管理しなければならない。微粒子やガス分子の汚染は極めて微量でもデバイス性能に致命的な影響を及ぼす。ミニマルファブではおよそ50工程程度までのトランジスタの試作は行って、大変優れた特性を示すことは証明した。しかし、実用プロセスではガス分子の制御を行うシステムの構築が必須となる。また、ミニマルファブは一つずつ製造するため、これまでの巨大バッチシステムとは生産管理の方法が全く異なってくる。どのような工場システムを開発すべきかということ自体が重大な開発課題である。

新しい生産システムをゼロから全て、単体のプロジェクトで構築した例はこれまで存在しないことから分かるように、本プロジェクトの最終的な目標である小型化された装置からなる半導体製造工場の完成は、極めて困難な目標である。その目標が達成される2020年には、多数のミニマルファブから構成される、21世紀型の新しいビジネスプラットフォーム（ミニマルストア）が世界に先駆けて出現し、これまで不可能であった製造産業のスモールビジネス化が達成できる。元々、本プロジェクトが開始される以前から、ミニマルファブ構想においては、全開発には10年を想定していた。第一期（2012-2014年度）は前工程の主要装置群、特にリソグラフィ装置群を開発する。第二期（2015-2017年度）は、小型化難開発装置群の実用化と簡易デバイス（MEMS、ディスクリートデバイス）の実用化を目標としている。第三期（2018-2021年度）には、大規模集積回路ファブの実用化を目指している。本プロジェクトはその第一期に該当するものである。第二期、第三期でのファクトリーの実用化という大目標に向けて、さらに資金が必要となりつつあり、ミニマルファブをシステムとして、市場投入するように、新たな資金獲得にも注力してゆく。

事業アウトカム達成に至までのロードマップ図



5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

研究開発実施においては、プロジェクトリーダー（原史朗：産業技術総合研究所）が研究開発テーマごとに編成したチームのマネジメントを行うことにより、全体の工程管理を実施し、関係機関と連携して研究開発を推進した。

既存の国家プロジェクトでは、一つの要素技術を開発するだけのものがほとんどである。このため、プロジェクトリーダー(PL)は、開発パートナーである主要数社とサブパートナー数社を取り纏めるだけで良かった。しかし、ミニマルファブは数十の要素技術を全て開発しなければならない。従って、プロジェクトリーダーの役割、すなわちマネージメントは大変高度なものになる。このために、まず、開発メーカには、国とのおつきあいや研究開発シーズの探索ではなく、開発当初から真に事業化を目的として社内の合意と意思決定を行うことを前提としてプロジェクトへ参画させた。このことで事業部が動くことになるので、事業化が大変スムーズになる。事業部での事業計画を立案するに当たっては、既に述べた、我々の知財-標準化-ブランド化-認証の総合戦略が大変有効である。それに加えて、世界中のおよそ 1050 のファブの実態（ウェハ径、最小線幅(ファブの能力)、生産量、デバイスの価格帯、デバイス種等）を全て調べあげ、かつ、ファブシステム研究会内部の多くのユーザ企業のヒアリングで、多品種少量市場の実態を明らかにした。このマーケットリサーチは、非常に手間がかかるために、マーケットリサーチ企業すら手を出さない実態調査である。この調査結果によれば、少量デバイスオーダーが全デバイス市場 30 兆円の半分にも達することが明らかとなった。ほとんどのデバイスは市場の末端の実態として 1 万個注文が普通であるという驚くべき実態も調べられた。これらの調査結果をミニマルファブの開発を志向する企業に提供することで、具体的な事業計画が成立するようになった。少量デバイスの事業というものは、グローバル事業と違い、他社とのバッティングが起りにくい。八百屋さんが無数にあって、地域に根ざした商売を行っていることと同じである。

先の知財-標準化-ブランド化-認証総合戦略があるため、企業はそのコミュニティの中で安心して開発と事業展開を行える。内部の開発企業だけにコア技術と小型化ノウハウが提供されるため、必然的にコミュニティには求心力が備わるようになっている。ミニマルファブのコミュニティは中小企業が中心であるが、大企業も中小企業も全く同列に開発が進められている。規模の経済とは違い、テクノロジーが中心の産業形態であるためである。

実際の研究開発体制は、PL の下に、約 130 社が一体化、一元化されている、極めて稀な体制を構築している。PL が開発企業を決定し、他の開発テーマと整合性がとれるように、その開発内容を決定する。開発を進めると様々な理由で、開発内容同士の整合性が低下してくるため、PL は適宜フレキシブルに開発内容の変更を開発企業との合意の元に決定する。装置開発においては、装置メーカが開発を行い、その開発装置を、産総研のつくば事業所に持ち込んで、熟成を行う。この熟成の成果を次の段階の開発装置にフィードバックする。これをおよそ半年～1年のサイクルで繰り返す。装置が他の装置と組み合わせて使える水準に達する段階（PJ2年目から）は、デバイスの試作を行うことになる。この体制は、装置開発を分散的に行い、その熟成とデバイスプロセスの開発をつくばの集中研で行うということを意味している。すなわち、本 PJ は集中研と分散研を有機的に組織化した新しいとも言える研究開発体制をとっており、それが真に実用化を進める上で大変有効に機能した。システムレベルの開発にはこの方式は大変有効であると考えられる。

以下では、数値的なアウトプットについて述べる。

国民への広報活動として、平成 24 年から 3 年間、セミコンジャパンに出展し、展示会会場におい

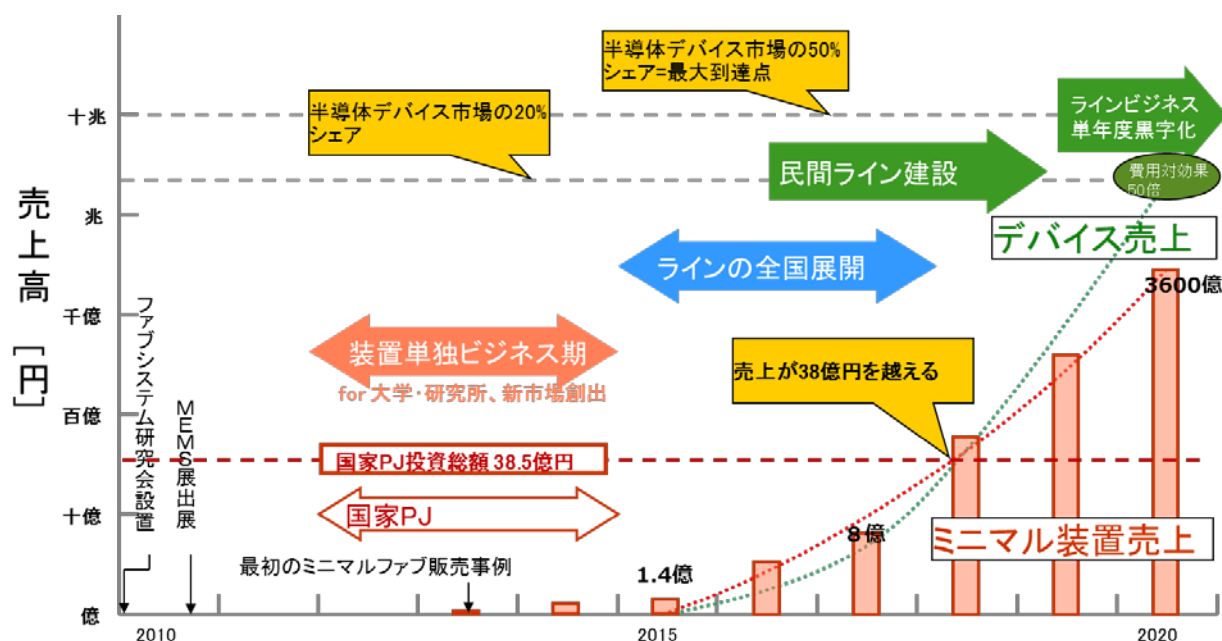
本事業終了後も、事業実施期間中と同じ開発実施体制によって適切にマネジメントを行っている。
必要に応じて新しい開発体制に移行するまでは、現在の体制で継続する予定である。

6. 費用対効果

投入された国費総額 38 億 4900 万円に対し、アウトプットとして、製造したミニマル装置の数は目標の 100 台に対し 105 台製造し、また、2020 年には、アウトカムとして省エネ効果（年間）891GWh を達成する見込みとなっている。

現時点で、ミニマルファブの装置売上げは累計 3 億円であるが、2020 年には、装置の売上が 3,600 億円となり、投入された国費総額に対する費用対効果が 50 倍を超えることが見込まれる。

費用対効果の図



投入された国費総額38億4900万円に対し、2020年にはアウトカムとして省エネ効果（年間）891GWhを達成する見込み。現時点で、ミニマルファブの装置売上げは累計3.6億円であるが、2020年には、装置の売上が3,600億円となり、投入された国費総額に対する費用対効果が50倍を超える見込み。

